

ной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 615-626.

3. Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3.

УДК 004.94

П. А. Сеченов, В. П. Цымбал, А. А. Оленников

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА И РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПЫЛЕВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

В статье рассмотрены особенности имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного ректора. Созданная имитационная модель позволяет сократить стадию пред-проектного исследования и опытно-конструкторские работы и уменьшить затраты на создание опытных физических установок. Имитационная модель основана на использовании метода статистических испытаний Монте-Карло и «первых принципов». В качестве первых принципов рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также возможные варианты их превращений и взаимодействий. Ядром этой модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. Алгоритм позволяет имитировать витание большого числа частиц в потоке несущего газа, в том числе с учетом столкновений частиц и обмена векторными значениями импульсов. На основе подобной методики создана имитационная модель вертикального гравитационного сепаратора для разделения компонентов пылевидных материалов. Приведен также пример данной методики для разделения очень мелкодисперсной пыли из газоочистки марганцевого производства на два ценных, ликвидных продукта.

Ключевые слова: имитационное моделирование, гравитационный сепаратор, Монте-Карло, кипящий слой, двухфазный поток.

Abstract

The article considers features of the simulation model of the gravitational separator of the column jet-emulsion reactor. The simulation model allows reducing the stage of pre-design research and development work and reducing the cost of creating experimental physical facilities. The simulation model is based on the Monte Carlo method of statistical tests and the "first principles". As the first principles, disperse particles of batch and reaction products are considered, as well as possible variants of their transformations and interactions. The core of this model is the process of flow around a condensed particle by a vertical gas flow. The algorithm allows simulating the flow of a large number of particles in the flow of a carrier gas, including taking into accounting the collisions of particles and the exchange of vector values of the pulses. An imitation model of a vertical gravitational separator is created on the basis of this method for separation of components of pulverized materials. An example of this technique is also given for the separation of very fine dust from manganese gas purification into two valuable, liquid products.

Keywords: simulation modeling, gravity separator, Monte Carlo, fluid bed, two-phase flow.

Представляемая статья является дальнейшим развитием многолетней работы коллектива ученых, производственников и проектировщиков, в процессе которой был создан и доведен до уровня крупномасштабной опытной установки на Запсибметкомбинате [1] новый ме-

таллургический процесс и агрегат СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор).

Важнейшим моментом реализации рассматриваемого процесса являются математические модели. Зонная модель процесса была рассмотрена ранее [2]. Ниже мы остановимся на одной из важнейших диссипативных структур – гравитационном сепараторе, который образуется в вертикальном колонном реакторе при определенных режимах течения двухфазного потока рабочей смеси, подготовленной в реакторе-осцилляторе.

При создании и математическом описании этой важной диссипативной структуры, предназначенной для разделения металла, шлака и газа, удалось реализовать имитационную модель, основанную на использовании метода Монте-Карло и «первых принципов». В данном случае в качестве первого (базового) уровня рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также все возможные варианты их превращений и взаимодействий.

Метод Монте-Карло появился более чем полвека назад [3], но интерес к этому методу [4] и примеры его применения [5, 6] увеличиваются. Недавно в англоязычном издании вышло фундаментальное справочное руководство по методу Монте-Карло, которое по праву можно считать энциклопедией по теории вероятностей и математической статистике, настолько широк круг вопросов, рассмотренных в нем [6]. Наиболее сложные и близкие к рассматриваемой ниже имитационной модели задачи [7] связаны с прохождением пучков элементарных частиц через вещества (преграды). Как будет показано ниже, при разработке представленной модели пришлось решать еще более сложную задачу: имитация состояния частиц шихты и их ансамблей не только в пространстве, но и во времени, при непрерывно изменяющемся физическом и химическом составе, а также учет возможности изменения внутреннего состояния частицы (продукта реакции) после каждого акта встречи. В связи с этим, несмотря на то, что имеется достаточно большое число алгоритмов и даже языков программирования таких задач [8], пришлось разработать специализированный алгоритм и программу.

Ядром рассматриваемой ниже модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. Прежде всего, рассмотрим механизм витания и взаимодействия дисперсных частиц шихты и продуктов реакции в вертикальном потоке несущего газа.

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{me}}{dt}, \quad (1)$$

где ω_{me} – скорость движения сферической частицы. В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg. \quad (2)$$

Сила давления потока:

$$F_C = c \cdot S \cdot p \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока); p – плотность смеси; ω – скорость потока смеси; c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса.

Подъемная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{me}} \rho \cdot g. \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

$$\frac{d\omega_{me}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{me}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (5)$$

Перейдём к рассмотрению соударений частиц. В имитационной модели различают два типа ударений: упругие (для нерасплавленных частиц) и неупругие (для расплавленных частиц). Для неупругого соударения, скорость объединенной частицы:

$$\omega = \frac{m_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{\omega}_2}{m_1 + m_2}. \quad (6)$$

Для упругих ударов из закона сохранения импульса и энергии получим:

$$\omega_1 = \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)}; \quad \omega_2 = \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}. \quad (7)$$

На рисунке 1 представлен фрагмент работы созданной имитационной модели [9], а также графическое представление результатов моделирования.

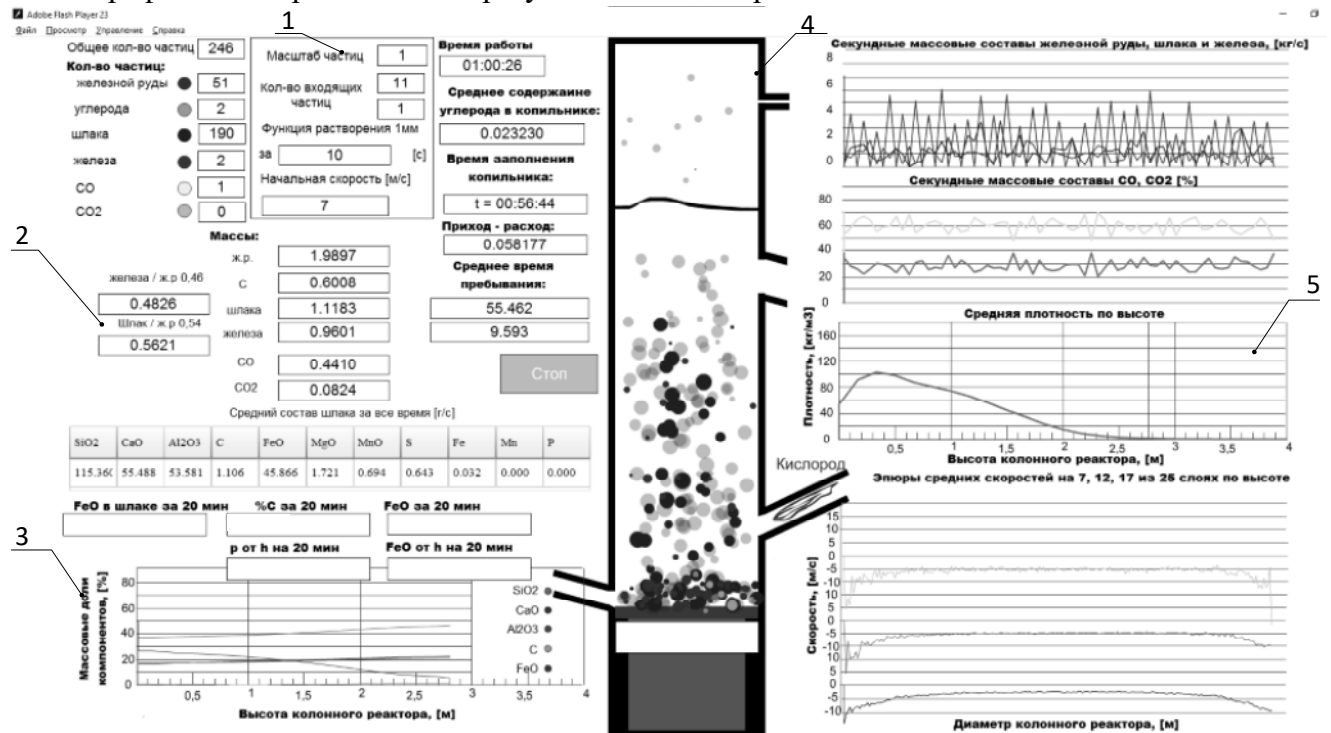


Рис. 1. Элементы интерфейса программы

Элементы интерфейса программы состоят из следующих пунктов:

1. Поля ввода данных, к которым относятся: масштаб частиц, количество входящих частиц железной руды и углерода, время растворения частицы железной руды и начальная скорость потока.
2. Поля отображения данных: общее количество частиц; количество частиц и массы: железной руды, углерода, шлака, железа, CO, CO₂, находящихся в реакторе; время работы программы с момента запуска; среднее содержание углерода в копильнике; объем и время заполнения копильника; соотношение масс частиц пришедших и ушедших из реактора; среднее время пребывания частиц железа и шлака в реакторе; таблица состава шлака.
3. График распределения массовых компонент частиц по высоте реактора.
4. Колонный реактор, в котором отображается положение частиц в реальном времени.
5. Графики: секундных массовых составов железной руды, шлака и железа, CO, CO₂; графики средних плотностей и скоростей частиц по высоте реактора, а также эпюры скоростей в заданных по высоте слоях.

После успешного решения задачи создания описанной выше модели была поставлена задача оценки возможности разделения составляющих мелкодисперсной пыли Новокузнецкого марганцевого завода.

Гранулометрический состав пыли распределен по нормальному закону в очень узком диапазоне 1–4 микрона, что пока не позволило найти приемлемый способ разделения входящих в ее состав очень ценных составляющих.

В данном исследовании в качестве исходного рассматривается вариант вертикального гравитационного сепаратора высотой 4 м и диаметром 1 м с использованием для разделения механизмов, протекающих в кипящем слое и надслоевом пространстве. Для решения этой задачи был использован рассмотренный выше подход и несколько модифицированный алгоритм, который позволяет имитировать витание большого числа частиц в потоке несущего газа, в том числе с учетом столкновений частиц и обмена векторными значениями импульсов. Проведенные с помощью разработанного исследовательского интерфейса многовариантные статистические эксперименты на имитационной модели вертикального гравитационного сепаратора, позволили получить оптимизированные параметры и результаты разделения компонентов, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Результаты разделения компонентов смеси, полученные за 5 минут эксперимента при начальной скорости 0,34 м/с

Наименование компонентов	Исходный состав компонентов, %	Состав компонентов после разделения, %		Состав от продуктов, %	
		нижний выход	верхний выход	нижний выход	верхний выход
SiO_2	5,08	1,02	4,07	1,66	10,51
MnO	11,58	10,92	0,95	17,81	2,45
Na_2O	5,08	0,17	4,92	0,27	12,71
K_2O	25,40	1,29	24,14	2,10	62,39
ZnO	30,48	29,33	1,19	47,83	3,07
PbO	17,78	17,53	0,14	28,59	0,36
Остальные	4,33	1,05	3,29	1,71	8,50
Итого	100	61,31	38,69	100	100

Как видно из таблицы, на нижнем выходе сепаратора получен продукт с суммарным содержанием MnO , ZnO , PbO равным 94 %, который может быть использован в качестве сырья для свинцово-цинкового производства, а на верхнем выходе – продукт с содержанием $K_2O=62$ % и $Na_2O=13$ %, по существу, ценное калийное удобрение.

Кроме представленных выше результатов, с помощью разработанной методики определены также основные режимные параметры: начальная скорость двухфазного потока, его плотность, распределение скорости и плотности по высоте и др.

Список использованных источников

1. Цымбал В.П. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и [др.]. – М: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
2. Ore enrichment required for a self-organizing Jet-EmulsionReactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchak // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39 No 4. – 310-312 с.
3. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method, – J. Amer. Statistical assoc. 1949 Vol 44 № 247. 335 – 341 pp.
4. Kroese, D.P.; Brereton T.; Taimre T.; Botev Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Comput Stat 6, 2014. – 386 – 392 pp.

5. Dunn W.L., Shultis J.K. Exploring Monte Carlo Methods. Elsevier, 2011. – 398 p.
6. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 [Текст]: учеб. Пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296 с.
7. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Wiley, 2011. – 743 p.
8. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
9. Сеченов П.А. Имитационная модель разделения составляющих пыли марганцевого производства / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал, А.А. Оленников // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 2. – С. 34-41.

УДК 662.74

А. И. Смирнов, Т. Ф. Богатова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СХЕМАХ С ГАЗОВЫМИ УТИЛИЗАЦИОННЫМИ ТУРБИНАМИ

Аннотация

Реализация потенциала вторичных энергоресурсов, возникающих в различных технологических процессах, является одним из существенных резервов энергосбережения. Потребности предприятий с полным металлургическим циклом в топливе могут в значительной мере покрываться за счет использования вторичных энергетических ресурсов. Наиболее мощным вторичным энергетическим ресурсом является доменный газ. В частности, за счет его сжигания в газовом балансе металлургических предприятий покрывается до 35–45 % потребности в теплоте. Применение схем с установкой газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ) является наиболее чистой и энергоэффективной технологией, поскольку она позволяет использовать энергию давления потока отработанного газа без применения дополнительного топлива. Система ГУБТ способствует сокращению в целом выбросов CO₂ и других выбросов пропорционально объему электроэнергии, выработанной без сжигания дополнительного топлива.

Ключевые слова: вторичные энергоресурсы, турбодетандер, газовая утилизационная бескомпрессорная турбина, выбросы CO₂

Abstract

Implementation of the potential of the waste energy resources arising in various technological processes is one of essential reserves of energy saving. Requirements of the enterprises with a full metallurgical cycle in fuel can be covered considerably due to use of waste energy resources. The most powerful waste energy resource is blast-furnace gas. In particular, due to his burning in gas balance of the metallurgical enterprises about 35–45 % of need for warmth become covered..Application of schemes with installation of the gas top pressure recovery turbine (TRT) is the cleanest and energy efficient technology as she allows to use energy of pressure of a exhaust gas stream without use of additional fuel. The TRT system promotes reduction in general of emissions of CO₂ and other emissions are proportional to the volume of the electric power developed without combustion of additional fuel.

Keywords: waste energy resources, turbo-expander, gas top pressure recovery turbine, CO₂ emission